

令和 5 年 5 月 1 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19H00768

研究課題名（和文）バンド内光学遷移分極の制御を基盤とした赤外増感型光電変換の新展開

研究課題名（英文）Novel development of infrared sensitized photovoltaics based on control of intraband optical transition dipole

研究代表者

喜多 隆 (Kita, Takashi)

神戸大学・工学研究科・教授

研究者番号：10221186

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 34,400,000円

研究成果の概要（和文）：量子ナノ構造を利用するとバンド内のサブバンド間光学遷移によって赤外波長域に応答する光電変換が可能になる。これを太陽電池に応用すると、一般的な価電子バンド - 伝導バンド間の光学遷移に加えてバンド内光学遷移が同時に発現し、太陽光の異なるスペクトル帯を幅広く吸収することによって太陽電池の変換効率を根本的に向上させることができる。本研究では、バンド内光学遷移始状態の電子占有率を制御してバンド間光吸収に相当するような強いバンド内光吸収を実現するとともに、高濃度不純物ドーピング量子ドットにおける局在表面プラズモン形成によって近赤外および中赤外領域における光アンテナ効果を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

バンド内光学遷移分極の制御はヘテロ界面に量子ドットを1層だけ挿入することによって強いバンド内光吸収を実現した。この量子ドットとヘテロ界面を融合した量子ナノ構造におけるバンド内光学遷移エンジニアリングは光応答中心と光学遷移で励起される電子密度を独立して制御できる新しいアイデアであり、量子ドット形状による光学遷移選択の制御に加えて、量子ドット中の表面プラズモン閉じ込めによる光吸収増強効果も明らかとなり、高効率な太陽電池実現に必要な基礎特性を得ることができた。さらに、バンド内光学遷移エンジニアリングは近赤外域からテラヘルツ波長帯にまで及ぶ高感度な光センシングデバイス実現に波及すると期待できる。

研究成果の概要（英文）：Using quantum nanostructures, it is possible to achieve photovoltaic conversion that responds to the infrared wavelength range by intra-band optical transitions. When applied this idea to solar cells, band-to-band optical transitions as well as intra-band optical transitions occur simultaneously, which can significantly improve the conversion efficiency of solar cells by absorbing different spectral bands of sunlight. In this study, we control the electron density in the quantum nanostructure to achieve strong intra-band optical absorption equivalent to inter-band light absorption, and also an optical antenna effect in the near-infrared and mid-infrared regions induced by localized surface plasmon formation in highly doped quantum dots has been clarified.

研究分野：半導体電子工学

キーワード：太陽電池 量子ドット バンド内遷移 赤外光吸収

## 1. 研究開始当初の背景

バンド内で発現するバンド内（あるいはサブバンド間）光学遷移はエネルギーが小さいため赤外波長域で応答する。これを太陽電池に応用すると、一般的な価電子バンドー伝導バンド間の光学遷移に加えてバンド内光学遷移が同時に発現し、太陽光の異なるスペクトル帯を幅広く吸収することによって太陽電池の変換効率を根本的に向上させることができる。バルクにおけるバンド内光学遷移は自由電子吸収として知られている。また、量子構造ではバンド内（サブバンド間）光学遷移エネルギーを利用して量子型赤外線センサー（吸収）や量子カスケードレーザー（発光）などの開発が進んでいる。バンド内遷移では入射光に対する偏光選択測に注意が必要である。2次元の自由度を持つ量子井戸の場合、量子井戸に垂直に入射する光に対してバンド内光学遷移は禁制であり、光吸収は生じない。一方、量子ドットを用いればすべての方位からの光に対してバンド内遷移は許容となるので、面型光センサーには最適である。しかし、量子ドットの面密度は  $10^{10}\text{cm}^{-2}$  程度であるので量子ドットにおけるバンド内光吸収強度をデバイスに利用できるように増強する必要がある。

われわれは、AlGaAs/GaAs ヘテロ界面に量子ドットを挿入した量子ナノ構造において、バンド間光吸収に相当するような非常に強いバンド内光吸収を発見した。このようなわずかに1層のヘテロ界面で強いバンド内光吸収が量子ドットによる増感現象であることが明らかになってきている。このような量子ナノ構造によるバンド内光学遷移のエンジニアリングは量子ナノ構造でないと制御できない物性である。

## 2. 研究の目的

量子ナノ構造を利用するとバンド内のサブバンド間光学遷移によって赤外波長域に応答する光電変換が可能になる。これを太陽電池に応用すると、一般的な価電子バンドー伝導バンド間の光学遷移に加えてバンド内光学遷移が同時に発現し、太陽光の異なるスペクトル帯を幅広く吸収することによって太陽電池の変換効率を根本的に向上させることができる。上で述べたように、半導体ヘテロ界面に量子ドットを挿入した量子ナノ構造において非常に強いバンド内光吸収が発現し、バンド内光吸収を介した2段階の連続的な光吸収によって本来なら透過して損失となる波長帯をカバーして光電変換することができる。バンド内光学遷移強度は、光電場で誘起される電子分極の大きさと遷移始状態の電子占有率に比例する。本研究では、量子ナノ構造を利用してバンド内光学遷移分極制御の学理を追求し、ナノ構造の制御と不純物ドーピングによってバンド間光吸収に相当するような増感型バンド内光吸収を実現するとともに、可視域から赤外域までの広い波長帯域で感度を有する高効率光電変換デバイスに応用する。

## 3. 研究の方法

本研究では、p型とn型に挟まれたダイオード構造の真性層に、AlGaAs/GaAs ヘテロ界面にInAs量子ドットを挿入した量子ナノ構造を作製し、電子のみを蓄積したヘテロ界面において量子ドットによって増強されたバンド内光吸収を実現する。バンド内光学遷移強度は、光電場で誘起される電子分極の大きさと遷移始状態の電子占有率に比例する。そこで、InAs量子ドットの形状制御によって、入射光に対する遷移選択則を最適化して光電場で誘起される電子分極を最大化する。さらに、変調ドーピングによってバンド内光学遷移始状態の電子占有率を制御するとともに、不純物制御した量子ドットにおける局在表面プラズモン形成によって近赤外および中赤外領域における光アンテナ効果を実証する。これら一連の成

果を応用して、ヘテロ界面において価電子バンド-伝導バンド間光学遷移とバンド内光学遷移の連続した 2 段階の遷移による電子のエネルギーをアップコンバージョン実現する。これを利用すれば、本来なら吸収されずに透過してしまう太陽光の赤外波長領域も利用することができるので太陽電池の変換効率を根本的に向上させることが可能になる。具体的には以下の 4 つのテーマで研究を推進した。

- ① 量子ナノ構造の作製と基礎光学特性評価
- ② バンド内光学遷移分極の制御とバンド内光吸収増強効果メカニズムの解明
- ③ 光吸収係数の定量評価とアップコンバージョン光電流の最大化
- ④ アップコンバージョン太陽電池の試作と基礎特性評価

## 4. 研究成果

### 4-1 量子ナノ構造への変調ドーピングによるバンド内光学遷移分極制御

アップコンバージョン太陽電池はワイドギャップ半導体(WGS)とナローギャップ半導体(NGS)を接合した太陽電池で、NGS で励起された電子がヘテロ界面に蓄積され、低エネルギーの光子を吸収してバンド内遷移が生じる。これにより太陽電池における主な損失である透過損失を減らすことが可能となり高い変換効率を実現できる。図 1 にアップコンバージョン太陽電池のバンドダイアグラムを示す。

WGS 側から光が入射した際、WGS のバンドギャップ以上のエネルギーを持つ光は WGS で吸収され、電子-正孔対を生成する。生成された電子と正孔は内部電界によって n-WGS と p-NGS にそれぞれドリフトする。WGS で吸収されずに透過した光は NGS で吸収され、励起された正孔は p-NGS へとドリフトする。しかし、NGS で励起された電子に関しては、WGS のバリアによってヘテロ界面に蓄積される。ヘテロ界面に蓄積された電子は、NGS のバンドギャップ以下の光によって WGS のバリアを超えることができ、ヘテロ界面で励起された電子は n-WGS へとドリフトすることができる。このような断熱的な二段階光励起プロセスによって、開放電圧はおける正孔の擬フェルミ準位との差と一致するため、NGS のみでの開放電圧と比較し、開放電圧の増大が期待できる。本研究では、WGS として  $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$  を使用し、NGS として  $\text{GaAs}$  を使用した。また、 $i\text{-Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$  層に変調ドーピングを行いヘテロ界面近傍における電界強度を制御した。

ヘテロ界面での電界強度が  $16.6 \text{ kV/cm}$  のアップコンバージョン太陽電池においてバンド内励起光強度を変化させながら光電流増加  $\Delta J_{\text{SC}}$  と電圧ブースト

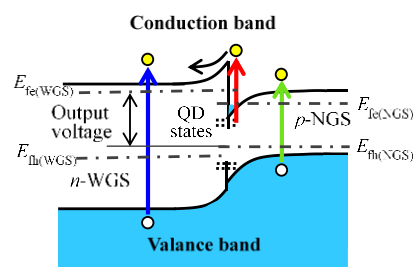


図 1 アップコンバージョン太陽電池

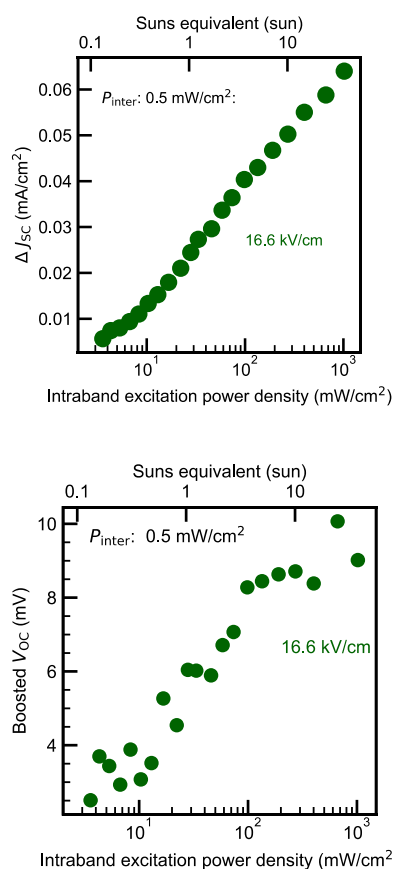


図 2 ヘテロ界面における電界強度が  $16.6 \text{ kV/cm}$  のアップコンバージョン太陽電池における (a)  $\Delta J_{\text{SC}}$  と (b)  $\Delta V_{\text{OC}}$  のバンド内励起光強度依存性。

$\Delta V_{oc}$ を測定した結果を図2(a)、(b)に示す。 $\Delta J_{sc}$ はバンド内励起光強度の増加とともに単調に増加した。 $\Delta V_{oc}$ も単調に増加し、バンド内励起光強度が増加すると遷移始状態の電子占有率が増加して断熱的な二段階光励起が増強されることを実証できた。

#### 4-2 不純物制御した量子ドットにおける光アンテナ効果

電子を含む量子ドットに表面プラズモンが局在して励起されると、電子密度に応じて赤外領域で共鳴的に大きな分極が誘起され高感度に応答する。本研究では、GaAs中に埋め込んだ半球状のInAs量子ドットについて外部から入射した電磁波(光)がどのように影響を受けるかを理論的に計算した。図3にシミュレーション結果を示す。電場増強度の波長依存性は明瞭な共鳴特性を示し、その共鳴波長は量子ドット中の電子密度に応じて近赤外から中赤外の波長域で制御できることが明らかになった。

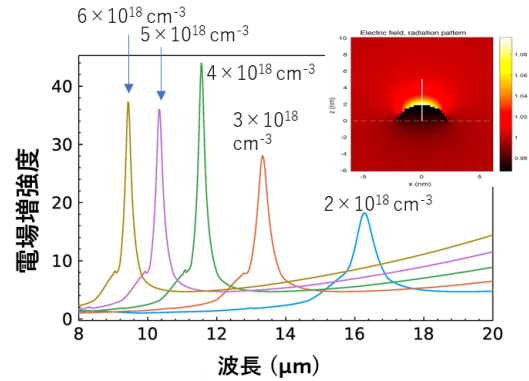


図3 量子ドットの電子密度に依存した局在プラズモン共鳴特性。

#### 4-3 アップコンバージョン太陽電池の基礎特性評価

バンド内遷移を介して生成される光電流及びフォトルミネッセンス(PL)強度はバイアス電圧に依存し、光電流とPLの相反関係が現れることを明らかにした。これは光電流としてキャリアを取り出した分だけ再結合するキャリアが減っていることを示しており、フォトンアップコンバージョン太陽電池において重要な特性である。さらに図4上のように、追加赤外光照射によるPL変化を詳しく調べた。追加赤外光照射によって光電流が増加し、PL強度は顕著に減少した。NGSで生成された電子のうち、IR光照射時に光電流として取り出される電子、輻射再結合、無輻射再結合によって失われるそれぞれの電子の割合をバイアス電圧を変化させて詳細にかつ定量的に評価したところ、図4下のような結果を得た。本来なら再結合して損失となるキャリアを光電流として取り出すことに成功している(図4の水色で示されたエリア)。これによりアップコンバージョン効率を算出し、動作下でのアップコンバージョン効率を見積もることに成功した。

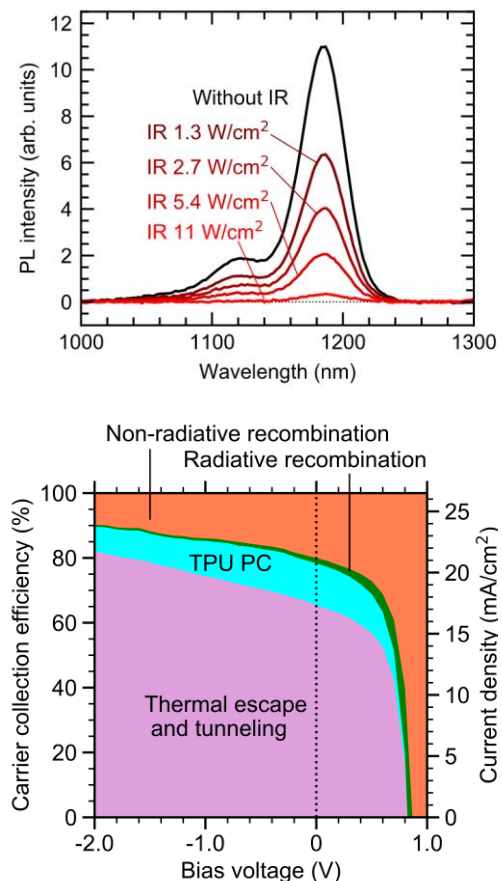


図4 アップコンバージョン太陽電池におけるバンド内光吸収による光電流増強と発光再結合の相反関係。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 4件）

|   |                               |
|---|-------------------------------|
| 1. 著者名<br>Y. Zhu, S. Asahi, K. Watanabe, N. Miyashita, Y. Okada, and T. Kita  | 4. 巻<br>129                   |
| 2. 論文標題<br>Two-Step Excitation Induced Photovoltaic Properties in an InAs Quantum Dot-In-Well Intermediate-Band Solar Cell  | 5. 発行年<br>2021年               |
| 3. 雑誌名<br>Journal of Applied Physics  | 6. 最初と最後の頁<br>074503-1-12     |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>10.1063/5.0036313  | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難  | 国際共著<br>-                     |
| 1. 著者名<br>T. Murata, S. Asahi, Stefano Sanguinetti, and T. Kita   | 4. 巻<br>10                    |
| 2. 論文標題<br>Infrared Photodetector Sensitized by InAs Quantum Dots Embedded Near an Al <sub>0.3</sub> Ga <sub>0.7</sub> As/GaAs Heterointerface                      | 5. 発行年<br>2020年               |
| 3. 雑誌名<br>Scientific Reports  | 6. 最初と最後の頁<br>11628-1-11      |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>10.1038/s41598-020-68461-w   | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスとしている（また、その予定である）   | 国際共著<br>該当する                  |
| 1. 著者名<br>N. Kinugawa, S. Asahi, and T. Kita  | 4. 巻<br>14                    |
| 2. 論文標題<br>Reciprocal Relation Between Intraband Carrier Generation and interband Recombination at the Heterointerface of Two-Step Photon Up-Conversion Solar Cells | 5. 発行年<br>2020年               |
| 3. 雑誌名<br>Physical Review Applied   | 6. 最初と最後の頁<br>014010-1-7      |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>10.1103/PhysRevApplied.14.014010   | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難  | 国際共著<br>-                     |
| 1. 著者名<br>Harada Yukihiro, Asahi Shigeo, Kita Takashi   | 4. 巻<br>12                    |
| 2. 論文標題<br>Bound-to-continuum intraband transition properties in InAs/GaAs quantum dot superlattice solar cells   | 5. 発行年<br>2019年               |
| 3. 雑誌名<br>Applied Physics Express   | 6. 最初と最後の頁<br>125008 ~ 125008 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>10.7567/1882-0786/ab56ef   | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスとしている（また、その予定である）   | 国際共著<br>-                     |

|  |                               |
|--|-------------------------------|
| 1. 著者名<br>Harada Yukihiro, Iwata Naoto, Asahi Shigeo, Kita Takashi                                 | 4. 巻<br>34                    |
| 2. 論文標題<br>Hot-carrier generation and extraction in InAs/GaAs quantum dot superlattice solar cells | 5. 発行年<br>2019年               |
| 3. 雑誌名<br>Semiconductor Science and Technology   | 6. 最初と最後の頁<br>094003 ~ 094003 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1088/1361-6641/ab33a2   | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスとしている (また、その予定である)   | 国際共著<br>-                     |

|   |                        |
|---|------------------------|
| 1. 著者名<br>Asahi Shigeo, Kaizu Toshiyuki, Kita Takashi   | 4. 巻<br>9              |
| 2. 論文標題<br>Adiabatic two-step photoexcitation effects in intermediate-band solar cells with quantum dot-in-well structure | 5. 発行年<br>2019年        |
| 3. 雑誌名<br>Scientific Reports  | 6. 最初と最後の頁<br>7859-1~8 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1038/s41598-019-44335-8  | 査読の有無<br>無             |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスとしている (また、その予定である)  | 国際共著<br>-              |

[学会発表] 計44件 (うち招待講演 4件 / うち国際学会 19件)

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>H. Mahamu, S. Asahi, T. Kita  |
| 2. 発表標題<br>Broadband Enhancement of Intraband Transition in Two-Step Photon Up-Conversion Solar Cells with a Doubled-Heterointerface Structure |
| 3. 学会等名<br>33rd International Photovoltaic Science and Engineering Conference(PVSEC-33) (国際学会)   |
| 4. 発表年<br>2022年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>S. Asahi, H. Mahamu, T. Kita  |
| 2. 発表標題<br>High Absorptivity of Intraband Transition Occurring at Heterointerface in Two-Step Photon Up-Conversion Solar Cells |
| 3. 学会等名<br>8th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion(WCPEC-8) (国際学会)  |
| 4. 発表年<br>2022年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>H. Mahamu, S. Asahi, T. Kita   |
| 2. 発表標題<br>Photoluminescence Characteristics of InAs Quantum Dots in the Doubled-heterointerface of AlGaAs/GaAs-based Two-step Photon Up-conversion Solar Cells |
| 3. 学会等名<br>9th International Symposium on Control of Semiconductor Interfaces(ISCSI-IX) (国際学会)  |
| 4. 発表年<br>2022年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>S. Asahi, M. NielsenK, N. Ekins-Daukes and T. Kita  |
| 2. 発表標題<br>Difference on Infrared-Induced Response Between N-i-p and P-i-n Structures of Two-Step Photon Up-Conversion Solar Cells |
| 3. 学会等名<br>International Conference on the Physics of Semiconductors(ICPS 2022) (国際学会)   |
| 4. 発表年<br>2022年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Y. Harada, K. Kusaki, S. Asahi, and T. Kita                                 |
| 2. 発表標題<br>Intraband Absorptivity in Two-Step Photon Up-Conversion Solar Cells         |
| 3. 学会等名<br>International Conference on the Physics of Semiconductors(ICPS 2022) (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2022年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>川上瑞人、原田幸弘、朝日重雄、喜多隆                           |
| 2. 発表標題<br>ドープされたInAs/GaAs量子ドットにおける局在表面プラズモン共鳴による電場増強効果 |
| 3. 学会等名<br>日本材料学会 2022年度エレクトロニクス部門委員会                   |
| 4. 発表年<br>2023年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Y. Harada, S. Asahi, and T. Kita  |
| 2. 発表標題<br>Intraband Transition in Two-Step Photon Up-Conversion Solar Cells; Y. Harada, S. Asahi, and T. Kita |
| 3. 学会等名<br>第41回電子材料シンポジウム (EMS41)  |
| 4. 発表年<br>2022年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Y. Toyo, S. Asahi, H. Mahamu, and T. Kita  |
| 2. 発表標題<br>Thermal Activation Process at the Heterointerface in Photon Up-Conversion Solar Cells Using hole Up-Conversion |
| 3. 学会等名<br>第41回電子材料シンポジウム (EMS41)   |
| 4. 発表年<br>2022年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>朝日重雄、H.Mahamu、喜多隆                           |
| 2. 発表標題<br>2段階フォトンアップコンバージョン太陽電池における ヘテロ界面のバンド内遷移の光吸収率 |
| 3. 学会等名<br>第69回応用物理学会春季学術講演会                           |
| 4. 発表年<br>2022年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>T. Kita   |
| 2. 発表標題<br>Control of Quantum-Dot Growth for Novel Solar Cells   |
| 3. 学会等名<br>14th International Symposium on Advanced Plasma Science and its Applications for Nitrides and Nanomaterials (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2022年  |



|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>T. Kita   |
| 2. 発表標題<br>Control of Carrier Dynamics in Quantum Dots for Intermediate-Band Solar Cells |
| 3. 学会等名<br>2021 International Conference on Solid State Devices (招待講演) (国際学会)            |
| 4. 発表年<br>2021年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>S. Asahi, and T. Kita  |
| 2. 発表標題<br>Two-step up-conversion solar cells: recent progress and future direction   |
| 3. 学会等名<br>8th International Workshop Epitaxial Growth and Fundamental Properties of Semiconductor Nanostructures (SemiconNano2021) (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2021年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Y. Zhu, S. Asahi, and T. Kita   |
| 2. 発表標題<br>Collection of Photocarriers Varied by Effective Electron Intraband Excitation in an InAs Quantum Dot-in-Well Intermediate Band Solar Cell |
| 3. 学会等名<br>48th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (国際学会)  |
| 4. 発表年<br>2021年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>T. Kaizu, I. Kohama, Y. Minami, T. Kitada, Y. Harada, O. Kojima, T. Kita, and O. Wada                            |
| 2. 発表標題<br>Lateral Photoconductivity of Multiple-Stacked InAs/GaAs Quantum Dot Structure for Photoconductive Antenna Device |
| 3. 学会等名<br>Compound Semiconductor Week(CSW)2021 (国際学会)  |
| 4. 発表年<br>2021年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>朝日重雄、H. Mahamu、喜多隆                          |
| 2. 発表標題<br>2段階フォトンアップコンバージョン太陽電池における ヘテロ界面のバンド内遷移の光吸収率 |
| 3. 学会等名<br>第69回応用物理学会春季学術講演会                           |
| 4. 発表年<br>2021年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>豊友太、朝日重雄、H. Mahamu、M. P. Nielsen、N. J. Ekins-Daukes、喜多隆 |
| 2. 発表標題<br>正孔フォトンアップコンバージョン太陽電池の赤外光照射による光電流制御                      |
| 3. 学会等名<br>第69回応用物理学会春季学術講演会                                       |
| 4. 発表年<br>2021年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>喜多隆                                     |
| 2. 発表標題<br>太陽電池のエネルギー変換効率と高効率化への道                  |
| 3. 学会等名<br>令和3年度 応用物理学会 多元系化合物・太陽電池研究会 年末講演会（招待講演） |
| 4. 発表年<br>2021年                                    |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>朝日重雄、M. P. Nielsen、池田一真、N. J. Ekins-Daukes、喜多隆   |
| 2. 発表標題<br>正孔のアップコンバージョンを利用した2段階フォトンアップコンバージョン太陽電池のバンド内遷移過程 |
| 3. 学会等名<br>第82回応用物理学会秋季学術講演会                                |
| 4. 発表年<br>2021年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Y. Zhu, S. Asahi, and T. Kita  |
| 2. 発表標題<br>On the Simulation of Two-Step Photocurrent Generation in an InAs Quantum Dot -in-Well Intermediate Band Solar Cell |
| 3. 学会等名<br>第82回応用物理学会秋季学術講演会  |
| 4. 発表年<br>2021年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>K. Watanabe, S. Asahi, Y. Zhu, and T. Kita  |
| 2. 発表標題<br>Up-Converted Photocurrent Enhancement in Modulation-Doped Two-Step Photon Up-Conversion Solar Cells |
| 3. 学会等名<br>47th IEEE Photovoltaic Specialists Conference ( 国際学会 )  |
| 4. 発表年<br>2020年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Y. Zhu, S. Asahi, and T. Kita  |
| 2. 発表標題<br>Intensive-Light-Induced Backtracking Voltage Phenomenon: An Insight into Intermediate-Band Solar Cell Output Performance |
| 3. 学会等名<br>47th IEEE Photovoltaic Specialists Conference ( 国際学会 )   |
| 4. 発表年<br>2020年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Y. Zhu, S. Asahi, and T. Kita  |
| 2. 発表標題<br>Efficiency Compensation from Intraband Transitions of Opposite Carrier in a Quantum Dot-in-Well Intermediate Band Solar Cell |
| 3. 学会等名<br>第68回応用物理学会春季学術講演会  |
| 4. 発表年<br>2020年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>渡辺航平、朝日重雄、喜多隆                          |
| 2. 発表標題<br>変調ドープした二段階フォトンアップコンバージョン太陽電池における電圧上昇効果 |
| 3. 学会等名<br>第68回応用物理学会春季学術講演会                      |
| 4. 発表年<br>2020年                                   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>K. Nakabayashi, S. Asahi, and T. Kita   |
| 2. 発表標題<br>Development of Mid-Infrared Photodetector Can Operate Under Room Temperature with High Sensitivity Using Intraband Transition |
| 3. 学会等名<br>第39回電子材料シンポジウム  |
| 4. 発表年<br>2020年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Y. Zhu, S. Asahi, K. Watanabe and T. Kita  |
| 2. 発表標題<br>Performance Analysis of an InAs/GaAs/Al <sub>0.3</sub> Ga <sub>0.7</sub> As Quantum Dot-in-Well Intermediate Band Solar Cell Under Two-Step Photoexcitations |
| 3. 学会等名<br>第39回電子材料シンポジウム   |
| 4. 発表年<br>2020年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>K. Watanabe, S. Asahi, Y. Zhu, and T. Kita  |
| 2. 発表標題<br>Dramatic Enhancement of Current and Voltage in Modulation-Doped Two-Step Photon Up-Conversion Solar Cells " |
| 3. 学会等名<br>第39回電子材料シンポジウム  |
| 4. 発表年<br>2020年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>朝日重雄、M. Nielsen, N.J. Ekins-Daukes, 喜多隆                    |
| 2. 発表標題<br>正孔のアップコンバージョンを利用した2段階フォトンアップコンバージョン太陽電池の追加赤外光による光電流減少メカニズム |
| 3. 学会等名<br>第81回応用物理学会秋季学術講演会  |
| 4. 発表年<br>2020年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Y.Zhu, S. Asahi, and T. Kita  |
| 2. 発表標題<br>Performance Degradation of Quantum Dot-in-Well Intermediate Band Solar Cell Under Intense Bi-Color Barrier and Intraband Photoexcitations |
| 3. 学会等名<br>第81回応用物理学会秋季学術講演会   |
| 4. 発表年<br>2020年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>渡辺航平、朝日重雄、喜多隆                           |
| 2. 発表標題<br>変調ドープした二段階フォトンアップコンバージョン太陽電池における光励起効率の向 |
| 3. 学会等名<br>第81回応用物理学会秋季学術講演会                       |
| 4. 発表年<br>2020年                                    |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>渡辺航平、朝日重雄、Yaxing Zhu、喜多隆        |
| 2. 発表標題<br>変調ドープによるフォトンアップコンバージョン太陽電池の特性制御 |
| 3. 学会等名<br>日本材料学会半導体エレクトロニクス部門委員会          |
| 4. 発表年<br>2020年                            |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Y. Harada, N. Iwata, S. Asahi, and T. Kita   |
| 2. 発表標題<br>Excitation Energy Dependence of Hot-Carrier Extraction Process in InAs/GaAs Quantum Dot Superlattice Solar Cells |
| 3. 学会等名<br>7th International Workshop on Epitaxial Growth and Fundamental Properties of Semiconductor Nanostructures (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2019年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>S. Asahi, and T. Kita  |
| 2. 発表標題<br>"Effect of the accumulated Electron Density at the Hetero-Interface in Two-Step Photon-Up Conversion Solar Cells |
| 3. 学会等名<br>7th International Workshop on Epitaxial Growth and Fundamental Properties of Semiconductor Nanostructures (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2019年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Y. Zhu, S. Asahi, and T. Kita  |
| 2. 発表標題<br>Extensively-Prolonged Electron Lifetime Within Room Temperature Upon InAs/GaAs Quantum Dot-in-Well Solar Cell    |
| 3. 学会等名<br>7th International Workshop on Epitaxial Growth and Fundamental Properties of Semiconductor Nanostructures (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2019年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>T. Murata, S. Asahi, and T. Kita   |
| 2. 発表標題<br>Infrared Photodetector Sensitized by QDs Inserted at the Hetero-Interface  |
| 3. 学会等名<br>7th International Workshop on Epitaxial Growth and Fundamental Properties of Semiconductor Nanostructures (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2019年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Y. Harada, N. Iwata, D. Watanabe, S. Asahi, and T. Kita                  |
| 2. 発表標題<br>Hot-Carrier Extraction in InAs/GaAs Quantum Dot Superlattice Solar Cells |
| 3. 学会等名<br>46th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (国際学会)                     |
| 4. 発表年<br>2019年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>S. Asahi, and T. Kita  |
| 2. 発表標題<br>Strong Voltage-Boost Effect in Two-Step Photon-Up Conversion Solar Cells |
| 3. 学会等名<br>46th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (国際学会)                     |
| 4. 発表年<br>2019年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>N. Kinugawa, S. Asahi, and T. Kita   |
| 2. 発表標題<br>Reciprocal Relationship Between Photoluminescence and Photocurrent in Two-Step Photon Up-Conversion Solar Cell |
| 3. 学会等名<br>46th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (国際学会)   |
| 4. 発表年<br>2019年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>原田幸弘、草木和輝、朝日重雄、喜多隆                |
| 2. 発表標題<br>2段階フォトンアップコンバージョン太陽電池におけるバンド内遷移特性 |
| 3. 学会等名<br>第67回応用物理学会春季学術講演会                 |
| 4. 発表年<br>2019年                              |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>朝日重雄、村田貴彦、StefanoSanguinetti、喜多隆   |
| 2. 発表標題<br>InAs量子ドットとAl <sub>0.3</sub> Ga <sub>0.7</sub> As/GaAsヘテロ界面を利用した赤外線検出器の受光感度特性 |
| 3. 学会等名<br>第67回応用物理学会春季学術講演会  |
| 4. 発表年<br>2019年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>渡辺航平、朝日重雄、喜多隆                                    |
| 2. 発表標題<br>変調ドーピングした二段階フォトンアップコンバージョン太陽電池におけるアップコンバージョン電流増大 |
| 3. 学会等名<br>第67回応用物理学会春季学術講演会                                |
| 4. 発表年<br>2019年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>村田貴彦、朝日重雄、喜多隆  |
| 2. 発表標題<br>InAs量子ドットを内包するAl <sub>0.3</sub> Ga <sub>0.7</sub> As/GaAsヘテロ界面における強いバンド内遷移と赤外光検出特性 |
| 3. 学会等名<br>第30回光物性研究会   |
| 4. 発表年<br>2019年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>絹川典志、朝日重雄、喜多隆                                       |
| 2. 発表標題<br>2段階フォトンアップコンバージョン太陽電池における光電流と輻射再結合電流の相反関係及びキャリア収集特性 |
| 3. 学会等名<br>第30回光物性研究会  |
| 4. 発表年<br>2019年  |



|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>T. Murata, S. Asahi, and T. Kita  |
| 2. 発表標題<br>Infrared Photodetector Sensitized by InAs Quantum Dots Embedded at a GaAs/Al <sub>0.3</sub> Ga <sub>0.7</sub> As Hetero-Interface |
| 3. 学会等名<br>第38回電子材料シンポジウム  |
| 4. 発表年<br>2019年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>村田貴彦、朝日重雄、喜多隆                          |
| 2. 発表標題<br>量子ドットを内包するヘテロ界面を利用した室温動作量子型赤外検出デバイスの開発 |
| 3. 学会等名<br>2019年度 第2回半導体エレクトロニクス部門委員会 第1回研究会      |
| 4. 発表年<br>2019年                                   |

〔図書〕 計1件

|   |                 |
|---|-----------------|
| 1. 著者名<br>Takashi Kita, Yukihiro Harada, and Shigeo Asahi | 4. 発行年<br>2019年 |
| 2. 出版社<br>Springer  | 5. 総ページ数<br>202 |
| 3. 書名<br>Energy Conversion Efficiency of Solar Cells      |                 |

〔出願〕 計1件

|                                 |                          |               |
|---------------------------------|--------------------------|---------------|
| 産業財産権の名称<br>量子型赤外線センサ           | 発明者<br>喜多隆、朝日重雄、<br>村田貴彦 | 権利者<br>同左     |
| 産業財産権の種類、番号<br>特許、特願2019-138335 | 出願年<br>2019年             | 国内・外国の別<br>国内 |

〔取得〕 計0件

〔その他〕

神戸大学大学院工学研究科フォトニック材料学研究室  
<http://www.research.kobe-u.ac.jp/eng-photonics/>

6. 研究組織

|       | 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号)                        | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号)             | 備考 |
|-------|--|-----------------------------------|----|
| 研究分担者 | 原田 幸弘<br><br>(Harada Yukihiro)<br><br>(10554355) | 神戸大学・工学研究科・助教<br><br><br>(14501)  |    |
| 研究分担者 | 朝日 重雄<br><br>(Asahi Shigeo)<br><br>(60782729)    | 神戸大学・工学研究科・准教授<br><br><br>(14501) |    |

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関       |  |  |  |
|---------|---------------|--|--|--|
| オーストラリア | ニューサウスウェールズ大学 |  |  |  |
| イタリア    | ミラノピッコカ大学     |  |  |  |